

ミリ波伝搬チャネルモデリング : Part 2

～多状態マルコフモデル～

唐沢好男

背景 (Part 1 で述べたこと)

- 地上系ミリ波通信では、見通し内 (LOS)、あるいは準見通し内 (準 LOS: SLOS) での利用が想定され、そのような環境を統計的に表す伝搬モデルが必要
- LOS/SLOS 環境に対する伝搬モデルは陸上移動体衛星通信 (LMSS) の分野 (主に準マイクロ波帯) で研究が行われてきており、そこで構築された伝搬モデルが活用できないだろうか
- LMSS では、LOS、SLOS、見通し外 (NLOS) の環境をマルコフモデルで表す多状態モデルが実測データをうまく説明できており、ミリ波伝搬に活用できないか
- この目的のため、同タイトル : Part 1 [1] では、SLOS 環境を表すモデルとして Loo 分布、仲上m分布、仲上・ライス分布、対数正規分布を取り上げ、簡易で精度のよい確率分布として、何はよいかを調べた。その結果、仲上m分布がこの目的に適合していることを明らかにした。
- 実際の通信は、LOS あるいは SLOS などの単一な伝搬環境ではなく、種々の LOS/SLOS が端末の移動と共に移り変わる多状態複合モデルで表される。この環境での確率分布の特徴を示した。

本レポート (Part2) では

- 伝搬状態の時間的な推移をシミュレーション可能なマルコフモデルの構築を行う。
- 3 状態および 4 状態で構成されるマルコフモデルについて、各状態の発生確率と平均継続時間を定めることにより、その特性を有する伝搬環境を生成するアルゴリズムを示す。
- 環境設定値と、マルコフモデルによって生成した時系列データの統計値を比較し、アルゴリズムの妥当性を確認する。

1. 基本機能と原理

前レポート (Part 1) では、端末の移動に伴っていくつもの環境を渡り歩いて行う通信に対する信号強度の確率分布について述べた[1]。ここでは時間の経緯と共に変化する環境を生み出す状態遷移モデルについて述べる (図 1)。

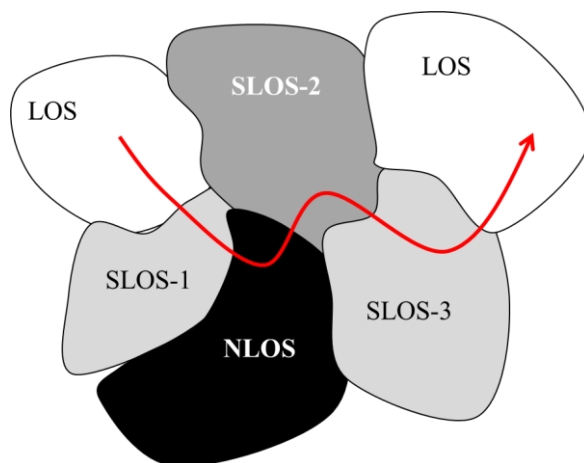


図 1 見通し内・準見通し内環境を中心に伝搬状態の異なる環境を移動しながら行う通信

ある状態から次の状態に移る動作を状態間の遷移確率に従うモデルはマルコフモデルと呼ばれる。ここでは、LMSS での伝搬に対して文献[2]で提案された 3 状態モデルの応用と 4 状態モデルへの拡張を述べる。

状態遷移に関しては、次の仮定と手順をとる (図 2)。

- 1) 状態数 N を決め、各状態 ($i=1, 2, \dots, N$) の発生確率 (全時間に対して状態 i が存在する割合) p_i と平均持続時間 (状態 i が持続する時間の平均値) $\langle \tau_i \rangle$ を入力値として与える。平均持続時間は、状態 i が占めるエリアの平均的な大きさ L_i と端末の移動速度 v より、 L_i/v で与える。
- 2) 任意の状態に留まる時間に比べて十分小さい時間間隔 Δt を基本ステップとして、 Δt 毎の状態変化を追う。
- 3) 状態の遷移はポアソン過程に従う。すなわち、状態に留まる時間 τ は、平均値 $\langle \tau \rangle$ に対して指数分布する。
- 4) 基本ステップ時間 Δt 後に状態が i から j に遷移する確率を p_{ij} とし、次式の遷移行列 \mathbf{P} で表す。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & p_{NN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

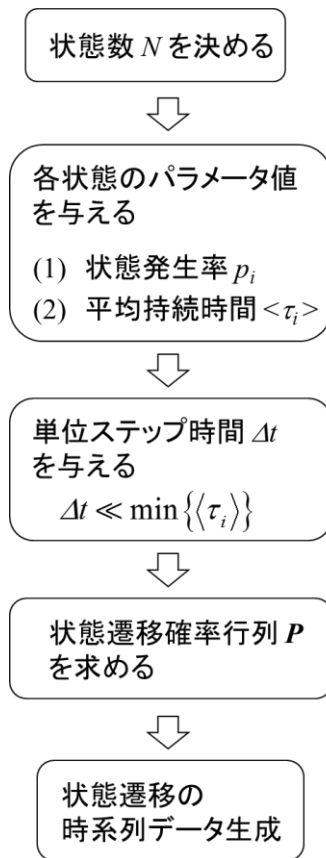


図2 状態遷移に関する前提と生成のための具体的な手順

上記仮定に基づき、以下、それぞれの状態発生確率 p_i ($i=1,2,\dots, N$)と平均継続時間 $\langle\tau_i\rangle$ から遷移確率 p_{ij} を求める方法を述べる。ここで新たな量として、単位時間 (= 1 秒) 内に他の状態から状態 i に変化する回数を N_i 、状態 j から状態 i に変化する回数を N_{ji} とすると、

$$N_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N N_{ji} = \frac{p_i}{\langle\tau_i\rangle} \quad (2)$$

である。

N_i は p_i と $\langle\tau_i\rangle$ から求められるので、これから N_{ij} を定めたい。 $N_{ij}=N_{ji}$ として、これを未知数とすると、方程式の数が N 、未知数が ${}_N C_2=N(N-1)/2$ となり、 $N=3$ 以外は、一意に定めることができない。以下、 $N=3$ と 4 について、具体的な定め方を示す。

2. 三状態マルコフモデル

図3に3状態マルコフモデルを示す。図では3つの状態に LOS、SLOS_L (遮へいが軽い準 LOS 環境: [1]の表1の f_2 のイメージ)、SLOS_H (遮へいが比較的強い準 LOS 環境: 同 f_4 のイメージ) の3つの状態を割り振っているが、本節での定式化においては、その割り振りに特段の意味はない。なお、以下の手順による3状態モデルの解は、[2]で求められている。

式(2)において、 $N=3$ では解が一意に定められる。状態を i, j, k とし、代表として N_{ij} を求めると、

$$N_{ij} (= N_{ji}) = \frac{1}{2} (N_i + N_j - N_k) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_i}{\langle \tau_i \rangle} + \frac{p_j}{\langle \tau_j \rangle} - \frac{p_k}{\langle \tau_k \rangle} \right) \quad (3)$$

となる。各状態の発生確率と平均滞在時間は $N_{ij}, N_{jk}, N_{ki} \geq 0$ を満たす条件で、任意に定めてよい。

遷移確率のうち、 Δt 後も同じ状態 i に留まる確率 p_{ii} は、ポアソン過程の仮定より指数分布となり、

$$p_{ii} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\langle \tau_i \rangle}\right) \approx 1 - \frac{\Delta t}{\langle \tau_i \rangle} \quad (4)$$

である。状態 i から j への遷移確率 p_{ij} は次式となる。

$$\begin{aligned} p_{ij} &= (1 - p_{ii}) \frac{N_{ij}}{N_{ij} + N_{ik}} \\ &= \frac{\Delta t}{2p_i} \left(\frac{p_i}{\langle \tau_i \rangle} + \frac{p_j}{\langle \tau_j \rangle} - \frac{p_k}{\langle \tau_k \rangle} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

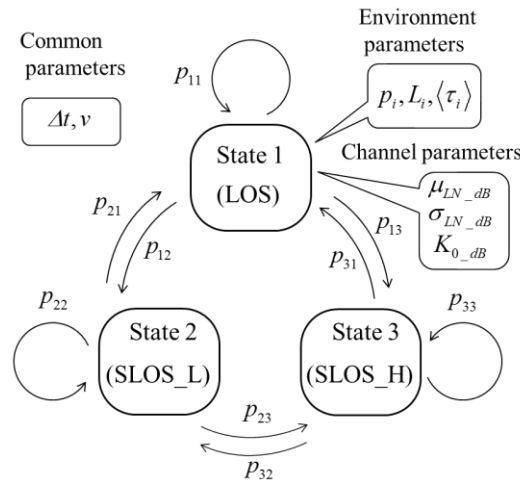


図3 3状態マルコフモデル (図中の Channel parameters は本レポートには関係しない)

3. 四状態マルコフモデル

状態数 N が 4 以上では、連立方程式(2)の式数 N が未知数 $N(N-1)/2$ より少ないので、 p_{ij} は $N=3$ の場合のように一意には定まらない。そこで、状態数 4 ($N=4$) について、解を求めるための一つの方法を述べる。

4 状態モデルは、応用として重要と思われる。図 4 はその構成であり、具体的な環境の割り当てが一例である。

ここでも $N_{ij}=N_{ji}$ として、式(2)の方程式を書き下ろすと、次式を得る。

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{12} \\ N_{13} \\ N_{23} \\ N_{14} \\ N_{24} \\ N_{34} \end{pmatrix} \quad (6)$$

この式は、方程式の数が 4 つに対して、未知数が 6 つなので、一意に解くことはできない。そこで、 $N_{24}=a, N_{34}=b$ と仮置きし、 $N_{12} \sim N_{14}$ の 4 つの未知数に対する方程式と見ると、

$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_{12} \\ N_{13} \\ N_{23} \\ N_{14} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ a \\ b \\ a+b \end{pmatrix} \quad (7)$$

となる。

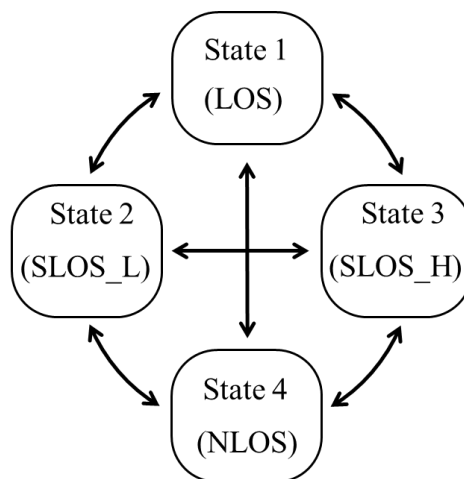


図 4 4 状態マルコフモデル

これより、6つの未知数は仮置きした a, b を含んで次式の形で解ける。

$$\begin{pmatrix} N_{12} \\ N_{13} \\ N_{23} \\ N_{14} \\ N_{24} \\ N_{34} \end{pmatrix} = 0.5 \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ a \\ -a-b \\ -a-b \\ a \\ b \end{pmatrix} \quad (8)$$

(8)式中の 6×4 行列の中の上側の 4×4 部分行列は、式(7)の 4×4 行列の逆行列 (0.5 をかけたものが) である。仮置きした a, b の値は、 $N_{12} \sim N_{34}$ のすべての値が正になる範囲で任意に選んでよい。実際のシミュレーションではこの具体的な与え方が求められるので、それを以下少し詳しく説明する。

(8)式の上4つの式を書き下すと、以下である。

$$N_{12} = 0.5(N_1 + N_2 - N_3 - N_4) + b > 0 \quad (9a)$$

$$N_{13} = 0.5(N_1 - N_2 + N_3 - N_4) + a > 0 \quad (9b)$$

$$N_{23} = 0.5(-N_1 + N_2 + N_3 + N_4) - a - b > 0 \quad (9c)$$

$$N_{14} = N_4 - a - b > 0 \quad (9d)$$

任意数 $a, b (>0)$ を定めるとき、(9a), (9b)からは、下限は存在するものの大きな制約はでてこない。一方、(9c)と(9d)には a, b の上限が存在し、ここで設定可能範囲が定められる。ここでは、設定可能範囲の中央値付近の値を与えることを推奨する。可能範囲のどの値を与えても、設定値の p_i と $\langle \tau \rangle$ は満足するが、極端な値 (例えば上限や下限に近い値) にすると、遷移の動作に不自然 (特定の状態間での遷移の偏り) が現われる。

シミュレーションを行う際には、環境を設定した後、(9)式の a, b を除く部分の値を見て、その段階で a, b の値入力を行うと良い。環境設定値の与え方によって、これを満たす a, b の値が存在しない場合があるが、それは環境の設定そのものに不合理がある場合 ($N=3$ のときの(5)式で言えば、 p_{ij} の値が負になるような与え方) であり、そうならないような設定が必要である。

これにより、式(1)で表される状態遷移確率行列 \mathbf{P} の要素 $p_{ij} (i \neq j)$ は次式で定められる。

$$p_{ij} = (1 - p_{ii}) \frac{N_{ij}}{N_{ij} + N_{ik} + N_{il}} \quad (10)$$

ここで、 i, j, k, l は4つの状態のどれかを表し、かつ、全て異なる状態に対応する。

4. 環境生成と動作確認

定式化した3状態および4状態マルコフモデルの動作を検証するために、表1に示す環境を設定した。動作の確認が目的であるので、設定値そのものの妥当性についてはここでは議論しない。共通のパラメータとして、移動速度を歩行速度程とし、 $v=1$ [m/s]とした。また、状態変化をみる基本ステップ時間は各状態の平均持続時間より十分小さい値として $\Delta t=0.1$ [s]とした。さらに、統計値を得るためのシミュレーション時間は、値が落ち着くまでの十分長い時間とし、 $T=100$ [h]とした。4状態モデルでは、3節で述べた任意数 a, b の定め方に従って求めた $a+b$ の上限が 0.0067 であったので、 $a=b=0.002$ とした。

表中には、生成したデータから求めた各状態の発生確率 p_i および平均持続時間 $\langle \tau_i \rangle$ の統計値を括弧内に示している。同表より、設定値と統計値は極めていく一致しており、目的どおりの環境が生成していることが確認できた。図5は実際に生成した状態遷移のシミュレーションデータの一部を示している。図には、それぞれの発生確率（存在確率）と平均持続時間を有して変化する様子が現われている。

状態毎に異なる特性のフェージングを発生するシミュレータ機能をこのマルコフモデルに組み入れれば、ダイナミックに変化する伝搬環境での伝送特性評価が可能になるであろう。

表1 マルコフモデルの環境設定値と生成データの統計値

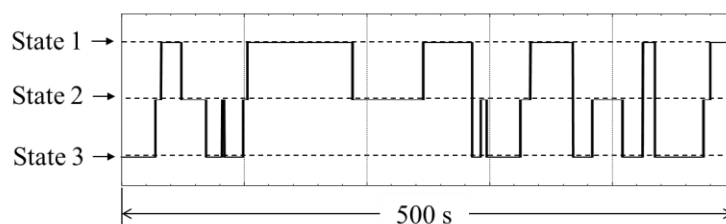
(共通パラメータ : $v=1$ [m/s], $\Delta t=0.1$ [s], $T=100$ [h]) .

(a) 3状態モデル

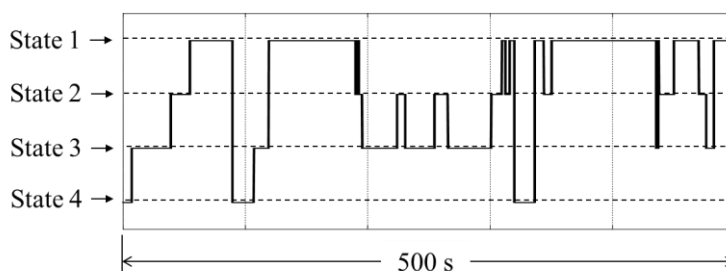
Environment parameters			
State	1 (LOS)	2 (SLOS_L)	3 (SLOS_H)
L_i [m]	40	10	20
p_i	0.5 (0.50)	0.2 (0.20)	0.3 (0.30)
$\langle \tau_i \rangle$ [s]	40 (40.2)	10 (10.2)	20 (19.9)
Calculated state transition matrix	$P = \begin{pmatrix} 0.9975 & 0.0018 & 0.0008 \\ 0.0045 & 0.9900 & 0.0056 \\ 0.0013 & 0.0038 & 0.9950 \end{pmatrix}$		

(b) 4状態モデル

Environment parameters				
State	1 (LOS)	2 (SLOS_L)	3 (SLOS_H)	4 (NLOS)
L_i [m]	30	10	20	15
p_i	0.4 (0.39)	0.2 (0.20)	0.3 (0.30)	0.1 (0.10)
$\langle \tau_i \rangle$ [s]	30 (29.4)	10 (10.2)	20 (20.0)	15 (15.0)
Calculated state transition matrix	$P = \begin{pmatrix} 0.9967 & 0.0020 & 0.0007 & 0.0007 \\ 0.0039 & 0.9900 & 0.0051 & 0.0010 \\ 0.0009 & 0.0034 & 0.9950 & 0.0007 \\ 0.0027 & 0.0020 & 0.0020 & 0.9933 \end{pmatrix}$			



(a) 3 状態モデル



(b) 4 状態モデル

図5 シミュレーションによって生成した状態遷移の様子の一例

参考文献

- [1] 唐沢好男, “ミリ波伝搬チャネルモデリング : Part 1,” 技術報告 (私報), TR-YK-044-rev, 2020.
http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_044_mmWave_channel_modeling.pdf
- [2] Y. Karasawa, K. Kimura, K. Minamisono, "Analysis of availability improvement in LMSS by means of satellite diversity based on three-state propagation channel model", *IEEE Trans. Vehicul. Technol.*, vol. 46, pp. 1047-1056, 1997.
- [3] 伊藤泰彦 (監修), 低軌道周回衛星通信システム (第6章: パーソナル衛星通信の電波伝搬), 電子情報通信学会, 1999. (上記[2]の日本語解説)